페로브스카이트 태양전지 연구 성과 및 동향

DOI: 10.3938/PhiT.28.046

송슬기·박혜진·신성식·양태열·전남중·서장원

Efficient and Stable Perovskite Solar Cells at the Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT)

Seulki SONG, Helen Hejin PARK, Seong Sik SHIN, Tae-Youl YANG, Nam Joong JEON and Jangwon SEO

The demand for energy to support advances in industry and to make living more convenient has increased exponentially, and limited energy resources on Earth are no longer able to

satisfy the increasing demands for more energy. In addition, energy sources, such as coal and petroleum, have added to environmental pollution, so interest in the development of sustainable, environmentally friendly energy is continuing and has become a future task that can no longer be delayed. Solar cells, which can convert solar energy into electrical energy, are the most representative environmentally friendly energy photoelectric conversion devices. At present, silicon solar cells show relatively high photoelectric conversion efficiencies, but they are not large enough for such solar cells to satisfy the increasing demands for energy due to material limitations and process difficulties. The perovskite solar cell is the next-generation solar cell, combining it with a silicon solar cell for tandem applications has been shown to be feasible. For those reasons, the Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT) has led the research of perovskite solar cells, the results of which have led to remarkable achievements worldwide. In this special issue, we would like to provide a brief introduction to perovskite solar cells and discuss the development of and the research on perovskite solar cells conducted at KRICT.

들어가는 글

산업의 고도화와 생활의 편의성을 충족하기 위해 인류가 필요로 하는 에너지 수요는 기하급수적으로 증가하였고, 한정된 에너지 자원으로 더 이상 필요 에너지량을 지속적으로 충당할 수 없는 상황에 직면했다. 이와 더불어 석탄, 석유 등의 에너지원은 환경오염이라는 추가적인 문제를 야기하여 지속가능하고 환경 친화적인 신재생 에너지의 개발에 대한 관심이 증가되고 있고, 이는 더 이상 미룰 수 없는 인류의 미래 과제가 되었다. 태양전지는 태양에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 가장 대표적인 친환경 에너지 광전변환 소자이다. 현재 실리콘 태양전지가 비교적 높은 광전변환 효율을 보여주고 있지만, 인류가 필요로 하는 에너지량을 감당하기에 한정된 소재 자원과

저자약력

송슬기 박사는 서울시립대학교에서 학사, 포항공과대학교에서 석박사통합과정으로 박사학위를 취득하였고, 독일 Max-Planck-Institut für Kohlenforschung에서 박사 후 연구원으로 근무했다. 현재 한국화학연구원에서 선임연구원으로 페로브스카이트 태양전지 소재 및 소자 관련 연구를 진행 중이다. (sksong@kRICT.re.kr)

박혜진 박사는 University of Rochester 학사, Harvard University에서 석박사통합과정으로 박사학위를 취득하였으며, U.S. Naval Research Laboratory에서 박사 후 연구원으로 근무했다. 현재 한국화학연구원에서 선임연구원으로 페로브스카이트 반투명과 탠덤 태양전지용 소재 및 소자 관련 연구를 진행 중이다. (hhpark@kRICT.re.kr)

신성식 박사는 경희대학교에서 학사, 서울대학교에서 석박사통합과정으로 박사학위를 취득하였고, 미국 Massachusetts Institute of Technology에서 박사 후 연구원으로 연구를 진행하였다. 현재 한국화학연구원에서 선임연구원으로 페로브스카이트 태양전지용 산화물 소재 및 소자 연구를 진행하고 있다. (sss85@kRICT.re.kr)

양태열 박사는 서울대학교 재료공학부에서 학사를 취득하고, 서울대학교에서 상변화 메모리 소재 및 소자 신뢰성 연구로 공학박사학위를 취득하였다. 서울대학교 신소재연구소와 독일 Max-Planck-Institut für Festkörperforschung에서 박사 후 연구원으로 근무한 뒤, 현재 한국화학연구원에서 선임연구원으로 페로브스카이트 태양전지 소재 및 소자 관련 연구를 진행 중이다. (taeyang@kRICT.re.kr)

전남중 박사는 전남대학교에서 학사, 석사, 박사학위를 취득하였고, 한국화학연구원에서 박사 후 연구원으로 근무했다. 현재 한국화학연구원에서 선임연구원으로 페로브스카이트 태양전지 소재합성 및 고효율 고내구성 소자 관련 연구를 진행 중이다. (njjeon@kRICT.re.kr)

서장원 박사는 서울대학교 섬유고분자공학과에서 학사, 석사학위를 취득하고 재료공학부에서 박사학위를 취득하였다. 미국 University at Buffalo에서 박사후연구원으로 근무한 뒤, 현재 한국화학연구원에서 책임연구원으로 페로브스카이트 태양전지 연구팀을 이끌고 있다. (jwseo@kRICT.re.kr)

Fig. 1. Crystal structure of perovskite.

복잡한 공정의 어려움을 극복해야 한다. 페로브스카이트 태양 전지는 차세대 태양전지 중에서 실리콘 태양전지와 탠덤 태양 전지로 병행 사용할 수 있는 높은 가능성을 보이고 있고, 한국 화학연구원에서는 페로브스카이트 태양전지 분야에서 고효율화 기술을 선도하여 세계적으로 괄목할만한 성과를 보여주고 있다. 이번 특집에서는 한국화학연구원에서 수행해온 페로브스카이트 태양전지에 대한 간략한 소개와 발전, 그리고 연구 동향에 관해 소개하고자 한다.

페로브스카이트 태양전지의 시작과 발전

유기태양전지(OPV), II-VI족(예: cadmium telluride, CdTe), I-III-VI족(예: copper indium gallium diselenide, CIGS), I-II-IV-VI족(예: copper zinc tin sulfide, CZTS), III-V족(예: gallium arsenide, GaAs) 등 많은 차세대 태양전지가 연구되어 왔다. 이러한 박막 태양전지는 흡수층의 재료 소모가 적고, 실리콘 잉곳, 모듈화 등의 공정 생략이 가능하여 제조원가 절감을 기대할 수 있어 유망한 연구대상으로 주목받아 왔다. 박막 태양전지는 물질의 높은 흡광계수를 이용하여 수 마이크로미터 이내의 박막을 도포 혹은 증착하여 충분한 양의 빛을 흡수할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 소재, 공정의 어려움이나 높은 가격으로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있었다. 그러던 중, 2009년 Tom Miyasaka 교수팀에서 처음으로 페로브스카이트 물질을 광흡수체로 소개하였다. 염료감응형 태양전지(dye sensitized solar cells, DSSCs) 기반에 염료를 페로브스카이트로 교체하여 태양전지로서 페로브스카이트 물질이 작동함을 보였다.^[1] 그러나 이때에는 액상의 전해질이 사용되었기 때문에 페로브스카이트 물질이 분해되는 문제가 있어 3.81% 정도의 낮은 효율이 보고되었다.^[1] 이후 고상의 정공전달물질(hole trans-

Fig. 2. Operation principle of perovskite solar cell.

port material, HTM)을 사용하는 고상 태양전지 연구결과가 발표되어 10% 이상의 높은 효율이 보고되었고,^[2-4] 이후 페로브스카이트 태양전지의 효율은 유래가 없는 빠른 발전 속도로 증가하였다. 전 세계의 태양전지 공인 효율을 정리한 NREL chart를 살펴보면 약 45년 동안 점진적으로 발전해온 실리콘 태양전지의 효율을 페로브스카이트 태양전지는 약 7년 여만에 비슷한 수준으로 추격하는 가파른 상승세를 보이며 대표적 차세대 태양전지로 각광받아오고 있다.^[5] 페로브스카이트는 러시아의 광물학자 페로브스키의 이름에서 유래되어 결정구조의 이름이 붙여졌다. 페로브스카이트는 ABX_3 형태의 결정구조를 가지며(그림 1) A, B는 양이온, X는 음이온의 전하를 띠는 물질로 구성되고, BX_6 의 팔면체의 코너가 공유되어 네트워크를 이루는 결정구조를 갖는다.

페로브스카이트 태양전지 구조 및 작동원리

페로브스카이트 태양전지는 광흡수체로서 전자전달층(electron transport layer, ETL)과 정공전달층(hole transport layer, HTL)

REFERENCES

- [1] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai and T. Miyasaka, J. Am. Chem. Soc. **131**, 6050 (2009).
- [2] H. S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im, K.-B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, J.-H. Yum, J. E. Moser, M. Grätzel and N.-G. Park, Sci. Rep. **2**, 591 (2012).
- [3] J.-H. Im, C.-R. Lee, J.-W. Lee, S.-W. Park and N.-G. Park, Nanoscale **3**, 4088 (2011).
- [4] M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami and H. J. Snaith, Science **338**, 643 (2012).
- [5] Best Research-Cell Efficiencies (NREL, 2019): <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20190923.pdf>.

Fig. 3. Structural development of perovskite solar cell.

사이에 존재하여 빛을 받으면 전자와 정공을 생성하고 생성된 전자는 전자전달층을 통해(①), 정공은 정공전달층(②)을 통해 이동하여 전기를 생산한다. 이외에 소자효율을 저하하는 재결합(recombination) 반응도 일어난다(③).(그림 2) 이는 전기를 받아 빛을 내는 LED(light emitting diode, 발광다이오드)와 정확히 반대의 원리라고 할 수 있다. 페로브스카이트는 먼저 다공성 TiO_2 층에 페로브스카이트가 채워진 meso device 구조의 소자형태로 먼저 발전하였다.^[6](그림 3) 그러나, 여기에 사용된 다공성 TiO_2 의 경우, 500 °C 이상의 높은 온도의 공정을 요구하게 되어 전극 소재의 선택에 제한을 두게 된다. 고온공정의 문제를 해결하기 위해 옥스포드 Henry Snaith 교수팀은 다공성 TiO_2 대신 150 °C의 저온공정이 가능한 Al_2O_3 를 사용하는 소자구조를 제안하였고,^[7] 그 후 얇은 전자전달층을 통해서만 전자를 전달하는 planar 구조의 소자가 제안되었다.^[8] Planar 구조의 소자를 제작할 경우, 얇은 전자전달층이 모든 생성되는 전자를 효과적으로 전달해야 한다는 중요성과 함께, 저온 공정이 가능하여 플라스틱 기판(PEN: polyethylene naphthalate or PET: polyethylene terephthalate)이 사용된 flexible 소자의 제작이 가능하다는 장점이 있어서 차세대 태양전지 소자의 구조로 여겨진다. 현재까지 보고되고 있는 초고효율의 태양전지 소자의 효율은 주로 다공성 TiO_2 를 사용한 mesoporous 구조의 소자를 통해서 보고되고 있지만 최근, planar 구조의 소자에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

페로브스카이트 태양전지 연구 성과

페로브스카이트 태양전지의 초기 연구에서부터, 최근 고효율 연구 성과에 이르는 경과를 주요 연구 그룹과 함께, 한국화학연구원의 대표적 연구성과를 간단하게 그림 4에 정리하였다. 한국화학연구원은 소재 및 박막 공정, 소자 구조 등의 원천 기술을 바탕으로 최근에는 계면 제어 기술을 개발하여 세계 최고 수준의 연구결과를 보고하며 NREL 차트의 세계효율 기록을 7번이나 갱신하며 해당분야를 선도하고 있다.

1. 태양전지 고효율화 연구 성과

페로브스카이트 태양전지 효율은 3.81%에서 약 10년만에

25.2%로 경이적인 효율 상승을 보여주었고 여기에는 한국화학연구원의 페로브스카이트 박막의 형태조절, 조성조절 등 페로브스카이트 광흡수층에 관한 연구가 중요한 역할을 하였다. 페로브스카이트 결정은 뛰어난 광흡수 성질을 갖는 반면, 용액공정을 통해서 박막을 형성할 경우, 적은 수의 결정 핵이 불균일하게 생성되어 치밀하고 균일한 박막을 얻기가 어렵다. 치밀하지 못한 페로브스카이트 박막은 재결합공간을 제공하고 소자의 효율을 감소시킨다. 한국화학연구원에서는 페로브스카이트 결정 생성을 억제하여 균일한 박막을 얻기 위해 dimethylsulfoxide(DMSO)가 포함된 중간상을 유도하고, 스핀코팅 공정 중에 toluene과 같은 반응매(anti-solvent)를 첨가하여 치밀한 박막 형성을 위한 핵의 수를 증가시키는 용매 공학기술(solvent engineering)에 관한 연구결과를 발표하였다.^[9] 반응매를 박막 도포 도중에 첨가할 경우, 중간상에서 DMSO를 추출하고 박막의 과포화도가 증가되어 순간 핵 생성이 극대화되고 치밀하고 균일한 페로브스카이트 박막이 만들어지게 된다. 용매 공학기술을 통해 16.2%의 높은 효율의 소자를 얻을 수 있었고 이는 대한민국 최초로 NREL 차트에 등재되었다. 용매공학기술은 현재에도 고효율의 페로브스카이트 태양전지를 얻기 위한 가장 보편적인 방법으로 사용되고 있다. 용매공학기술을 발전시켜, 중간자로 사용하였던 DMSO를 이용, PbI_2 -DMSO 필름을 형성하고, 유기 할로겐화물을 DMSO와 교환하여 페로브스카이트를 만드는 방법인 분자교환반응법(intramolecular exchange process)을 이용하여 한국화학연구원이 세계 최고효율을 20.11%로 다시 갱신하였다.^[10]

고효율의 페로브스카이트 태양전지를 얻기 위해서는 형태 제어 외에도 화학적 조성조절을 통한 높은 전류밀도와 개방전압을 얻는 것이 중요하다. 페로브스카이트 태양전지 연구 초기에 사용된 조성은 MAPbI_3 이며, 이는 1.57 eV의 밴드갭(band gap)을 갖는다. 페로브스카이트의 할로겐의 조성이 I에서 br 혹은 Cl로 변화함에 따라 밴드갭이 증가하는 반면, 물질의 흡광 범위 및 양이 변화하여 전류가 감소한다. 고효율의 태양전지를 위해서는 높은 광전류밀도가 중요하며, 이를 위해서는 페로브

REFERENCES

- [6] J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Choi, Md. K. Nazeeruddin, M. Grätzel and S. I. Seok, J. Mater. Chem. A **1**, 11842 (2013).
- [7] J. M. Ball, M. M. Lee, A. Hey and H. J. Snaith, Energy Environ. Sci. **6**, 17393 (2013).
- [8] G. E. Eperon, V. M. Burlakov, P. Docampo, A. Goriely and H. J. Snaith, Adv. Funct. Mater. **24**, 151 (2014).
- [9] N. J. Jeon, J. H. Noh, Y. C. Kim, W. S. Yang, S. Ryu and S. I. Seok, Nat. Mater. **13**, 897 (2014).
- [10] W. S. Yang, J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo and S. I. Seok, Science **348**, 1234 (2015).

Fig. 4. Achievements of KRICT in perovskite solar cell research.

스카이트의 밴드갭을 줄이는 것이 중요하다. 따라서 MA^+ 를 FA^+ 로 대체하는 연구가 진행되기 시작하였다. FA^+ 를 사용한 $FAPbI_3$ 의 경우에는 밴드갭이 좁고 높은 광전류 밀도를 가질 수 있지만, 빛을 흡수할 수 있는 α 상과 빛을 흡수할 수 없는 δ 상이 공존한다는 단점이 있다. δ 상 페로브스카이트는 밴드갭이 넓어 광흡수 특성을 감소시켜 태양전지의 효율을 크게 감소시킨다. 일반적으로 δ 상이 상온에서 더 안정하여, 태양전지의 효율을 극대화시킬 수 있는 α 상의 순수한 페로브스카이트를 제조하는 것이 매우 중요하다. 한국화학연구원에서는 2015년 $FAPbI_3$ 에 소량의 $MAPbBr_3$ 를 혼합할 경우 순수한 α 상의 $FAPbI_3$ 가 만들어지고 유지된다는 것을 확인하였다.^[11] $MAPbBr_3$ 의 비율이 변화함에 따라 밴드갭이 변하여 페로브스카이트 결정의 색이 변하게 되고, α 상의 안정화 정도 또한 바뀌는 결과를 보고하였다.(그림 4) 15 mol%의 $MAPbBr_3$ 가 혼합된 $(FAPbI_3)_{0.85}(MAPbBr_3)_{0.15}$ 에서 가장 우수한 태양전지 특성이 보이는 것을 확인하였고, 17.96%의 공인 인증을 달성하였다. 이 연구를 계기로 세계 대부분의 연구자들이 $FAPbI_3$ 기반의 페로브스카이트 태양전지를 연구하기 시작하였고, $FAPbI_3$ 를 안정화시키기 위해 여러 다른 원자를 페로브스카이트에 혼합하는 연구가 활발히 진행되었다.^[12-14]

이러한 고효율화 기술은 페로브스카이트 소자 구조, 박막 제어 공정, 소재 조성 제어에 바탕을 두고 개발되었으며 2017년 22.7%와 2018년 23% 이상의 효율 향상은 박막 표면 및 계면 제어 기술을 통해 이루어지고 있다. 최근 한국화학연구원은

2019년 4월, 24.2%, 2019년 8월, 25.2%의 세계 최고 효율을 인증받아 NREL 차트에 등재하였고 이는 실리콘 태양전지의 최고효율에 매우 근접한 결과이기에 페로브스카이트 태양전지 상용화를 위한 관심이 더욱 고조되고 있다.

2. 태양전지 고내구성 연구 성과

현재 페로브스카이트 태양전지는 상용화를 위한 충분한 고효율을 보이고 있지만, 내구성 향상을 위한 과제가 남아 있다. 페로브스카이트 태양전지는 수분, 빛, 열에 의한 외부 환경 요인에 대응되는 장기 안정성이 요구된다. 이를 해결하기 위해서

REFERENCES

- [11] N. J. Jeon, J. H. Noh, W. S. Yang, Y. C. Kim, S. Ryu, J. Seo and S. I. Seok, *Nature* **517**, 476 (2015).
- [12] M. Saliba, T. Matsui, J.-Y. Seo, K. Domanski, J.-P. Correa-Baena, M. K. Nazeeruddin, S. M. Zakeeruddin, W. Tress, A. Abate, A. Hagfeldt and M. Grätzel, *Energy Environ. Sci.* **9**, 1989 (2016).
- [13] M. Saliba, T. Matsui, K. Domanski, J.-Y. Seo, A. Ummadisingu, S. M. Zakeeruddin, J.-P. Correa-Baena, W. R. Tress, A. Abate, A. Hagfeldt and M. Grätzel, *Science* **354**, 206 (2016).
- [14] M. Abdi-Jalebi, Z. Andaji-Garmaroudi, S. Cacovich, C. Stavrakas, B. Philippe, J. M. Richter, M. Alsari, E. P. Booker, E. M. Hutter, A. J. Pearson, S. Lilliu, T. J. Savenije, H. Rensmo, G. Divitini, C. Ducati, R. H. Friend and S. D. Stranks, *Nature* **555**, 497 (2018).

Fig. 5. (a) Chemical structures of Spiro-OMeTAD and DM. (b) DSC curves of the DM powder with and without dopants. (c) Stability of the devices stressed at different temperatures of 60, 70 and 80 °C in air (~25% RH) with DM and Spiro-OMeTAD and long-term stability of the solar cells under (d) heat and (e) light.

페로브스카이트 소재의 자체 안정성 향상을 위한 연구 노력과 함께, 소자를 이루고 있는 안정한 정공전달 물질(HTM)을 개발하거나 페로브스카이트 박막 계면의 안정성을 확보하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

정공전달물질(HTM)은 소자의 내구성과 관련된 매우 중요한 소재이다. 일반적으로 HTM 물질로 사용되는 Spiro-OMeTAD의 경우, 전도도를 향상시키기 위하여 Li 기반의 첨가제와, 용해도 개선을 위해 4-tert-butyl pyridine이 사용된다. Li 기반의 첨가제는 수분을 흡수하는 성질이 뛰어나 소자 성능을 감소시키는 주요 원인으로 꼽히고 있다. Spiro-OMeTAD 소재를 적용한 태양전지 소자는 비교적 열적 안정성이 떨어지는 경향을 보였다. 한국화학연구원에서는 기존의 Spiro-OMeTAD의 말단 그룹을 상대적으로 분자 크기가 큰 플루오렌으로 치환하는 간단한 방법을 통하여 DM이라는 HTM을 개발하여 유리 전이온도(T_g)를 획기적으로 향상시켜 열에 대한 안정성을 확보한 연구결과를 보고하였다.^[15](그림 5(a), (b)) DM이 사용된 소자는 Spiro-OMeTAD 기반의 소자보다 높은 효율을 60 °C에서 500시간 이상의 열안정성과 300시간 동안 90% 이상의 효율을 유지하는 광안정성을 확보한 연구결과를 보고하였다. 상용화의 기준을 충족하는 80 °C에서의 우수한 열적 특성을 확보하기 위해서 더 뛰어난 열적 안정성을 지닌 HTM을 찾고자 하는 연구가 진행되었다. 저렴한 소재인 CuPC(Copper(II) phthalocyanine)은 Spiro-OMeTAD와 같은 단분자보다 낮은 소자 효율을 보여주었지만, -45 °C ~ 85 °C의 온도 사이클에서 매우 안정한 성능을 보여주었다.^[16] 이와 더불어 한국화학연구원에서는 전도성 고분자인 PTAA를 이용하여 열안정성을 확보함과 동시에 높은 전도도를 제공하여 85 °C 조건 장기 안정성을 확인한 후, 1000시간 동

안 빛에 노출된 후에도 20% 이상의 높은 효율의 연구결과를 보고하였다.^[17]

한국화학연구원에서는 기존 페로브스카이트 박막 표면에 긴 알킬체인을 갖는 n-hexyl trimethyl ammonium bromide(HTAB)을 도입하여 박막 표면에 얇은 와이드 밴드갭 페로브스카이트층을 형성하여 double-layer halide perovskite architecture(DHA)를 제안하였다.(그림 6(a), (b)) 이를 통해 페로브스카이트 박막 표면 결함을 줄이고 HTAB 물질의 소수성 알킬 체인과 상호 작용을 할 수 있는 상용 전도성 고분자인 P3HT를 정공수송소재로 도입하여 높은 정공 이동도가 가능한 섬유(fibril) 형태의 자기조립체를 유도하여(그림 6(c)) 22.7%의 고효율과 높은 안정성을 확보할 수 있었다. DHA 구조를 갖는 페로브스카이트와 상용 전도성 고분자인 P3HT로 구성된 태양전지 소자는 봉지기술 없이도 85%의 습도에서 1000시간 동안 초기효율의 80%의 효율을 유지하였으며, 봉지화 이후, 1-Sun의 빛 조사에서도 95%의 효율을 유지하는 우수한 장기 내구성을 보여주었다(그림 6(d)).^[18] 이러한 기술을 적용하여 24.97 cm²의 대면적 페로브스카이트

REFERENCES

- [15] N. J. Jeon, H. Na, E. H. Jung, T.-Y. Yang, Y. G. Lee, G. Kim, H.-W. Shin, S. Il Seok, J. Lee and J. Seo Nat. Energy **3**, 682 (2018).
- [16] Y. C. Kim, T.-Y. Yang, N. J. Jeon, J. Im, S. Jang, T. J. Shin, H.-W. Shin, S. Kim, E. Lee, S. Kim, J. H. Noh, S. I. Seok and J. Seo, Energy Environ. Sci. **10**, 2109 (2017).
- [17] T. Y. Yang, N. J. Jeon, H.-W. Shin, S. S. Shin, Y. Y. Kim and J. Seo, Adv. Sci. 1900528 (2019).
- [18] E. H. Jung, N. J. Jeon, E. Y. Park, C. S. Moon, T. J. Shin, T.-Y. Yang, J. H. Noh and J. Seo, Nature **567**, 511 (2019).

Fig. 6. (a) Structure of an n-i-p perovskite solar cell based on a DHA (double-layered halide architecture (DHA)) using P3HT as the hole-transport material. (b) Cross-sectional HRTEM images of the NBH(narrow-bandgap-halide)/DHA (c) Atomic force microscopy phase images of P3HT on the DHA (d) Results of humidity stability tests on the unencapsulated control and DHA devices under 85% relative humidity at room temperature. Inset, photographs of the control (left) and the DHA (right) device after 200 h under 85% relative humidity at room temperature and Results of operational stability tests on the encapsulated control and DHA devices by tracking at their maximum power points under 1-Sun illumination. (e) Photograph of a 5 cm × 5 cm DHA-based solar module.

Fig. 7. (a) Schematic illustration of roll-to-roll process for perovskite solar cell. (Inset) Optical images of films wound on rolls. (b) Image of PbI_2 roll printed by roll-to-roll process. (Inset) Images of converting PbI_2 to perovskite, and MAPbI_3 roll.

모듈에서도 17.1%의 높은 효율을 보여주었고, 상용화에 근접한 기술에 의한 결과이기에 더 큰 의미가 있다.(그림 6(e))

롯 롤투롤 공정이 적용된 첫 번째 페로브스카이트 태양전지에 해당된다.

3. 상용화를 위한 태양전지 연구 성과

페로브스카이트 태양전지는 연구실 수준에서 상용화를 위한 연구 단계로 발전하기 위해서는 용액공정 기반의 대면적 코팅 법과 롤투롤(Roll to Roll) 기반의 연속 공정이 개발되어야 한다. 이러한 기술이 현실화된다면 실리콘 태양전지에 비해 현저히 낮은 생산비용으로 고효율 태양전지를 대량 생산할 수 있다는 장점이 있다. 한국화학연구원에서는 핀란드의 VTT 연구소와 공동연구를 통하여 그라비아 인쇄(Gravure printing) 방법을 이용한 페로브스카이트 태양전지 제작에 관한 연구결과를 발표하였다.^[19] 그라비아 인쇄 공정을 위한 점도, 프린팅 속도, engraving 개수 등의 요인을 고려하여 그림 7(a), (b)에서와 같이 ETL, Perovskite, HTL을 모두 그라비아 인쇄 방법을 통하여 제작하였다. 그라비아 인쇄에 의해 제작된 페로브스카이트는 Spiro HTM을 이용한 경우 7.8%, P3HT를 이용한 경우 9.7%의 효율을 보고하였다. 이는 그라비아 인쇄 기반의 파일

결론

한국화학연구원은 페로브스카이트 태양전지의 고효율화 기술력을 바탕으로 2019년 현재, 25.2%의 세계 최고 인증효율을 통해 이 분야를 세계적으로 선도하고 있다. 이러한 높은 효율은 실리콘 태양전지 최고 성능에 매우 근접하여 페로브스카이트 태양전지의 상용화에 대한 관심을 더욱 고조시키고 있다. 한편, 한국화학연구원은 상용화를 위한 요소 기술인 페로브스카이트 태양전지의 대면적화 및 연속 공정 개발, 안정성 확보를 위한 연구 수행을 꾸준히 대응해 오고 있고 최근 세계적으로 주목받는 성과를 이룬 바 있다. 앞으로 페로브스카이트 태양전지가 실리콘 태양전지와 함께, 태양광 시장에서 주목받는 시대가 곧 다가오기를 기대해 본다.

REFERENCES

- [19] Y. Y. Kim, T.-Y. Yang, R. Suhonen, M. Välimäki, T. Maaninen, A. Kemppainen, N. J. Jeon, J. Seo Adv. Sci. **6**, 1802094 (2019).